

География

УДК 551.511.3

**Мищенко Юрій Дмитрович**

*кандидат технических наук, директор*

*Частное предприятие “Центр данных “Информматериал”*

**Міщенко Юрій Дмитрович**

*кандидат технічних наук, директор*

*Приватне підприємство “Центр даних “Інформматеріал”*

**Mishchenko Iurii**

*Candidate of Technical Sciences, Director*

*Private Enterprise “Data Center “Informmaterial”*

**ПРИРОДА ВИХРЕЙ**

**ПРИРОДА ВИХОРІВ**

**WHIRLWIND NATURE**

**Аннотация.** Отмечено условие, необходимое для появления вихрей. На основе законов сохранения предложена инженерная модель вихря и порождающего его потока, как двух тесно взаимодействующих объектов. Объяснены источники разрушительной силы торнадо. Предложен способ борьбы с торнадо. Получены аналитические зависимости, связывающие параметры вихрей с характеристиками окружающей среды. Приведены конкретные расчетные примеры.

**Ключевые слова:** вихрь, торнадо, смерч, энергия, импульс.

**Анотація.** Відмічена умова, необхідна для появи вихорів. На основі законів збереження запропонована інженерна модель вихору і породжуючого його потоку, як двох тісно взаємодіючих об'єктів. Пояснені джерела руйнівої сили торнадо. Запропоновано засіб боротьби з торнадо. Отримано аналітичні залежності, що зв'язують параметри вихорів з

характеристиками навколошнього середовища. Наведено конкретні розрахункові приклади.

**Ключові слова:** вихор, торнадо, смерч, енергія, імпульс.

**Summary.** The condition necessary for occurrence of whirlwinds is noted. The engineering model of whirlwind and the flow generating it as two closely interacting objects is proposed based on conservation laws. The sources of destructive power of tornado are explained. The method for tornado control is proposed. Analytical dependencies connecting the parameters of whirlwinds with the environmental characteristics are obtained. Concrete calculation examples are given.

**Key words:** whirlwind, tornado, twister, energy, impulse.

**Введение.** Проблема понимания природы вихрей их образования и источников силы является одной из сложнейших и не решенных до настоящего времени задач современности. Огромный урон, наносимый к примеру смерчам, делает проблему не только научной, но и общечеловеческой.

Существующие теории и модели вихрей традиционно развивались в рамках гидродинамики [1]. В основе их, как правило, лежит некая феноменологическая система уравнений. Они позволяют, к примеру, рассчитывать поля скоростей и давлений на периферии вихря.

Наблюдаемые в естественных условиях масштабные вихреобразования в виде торнадо, позволили предположить, что смерч возникает вследствие интенсивного испарения и конденсации паровоздушных масс и возникновения интенсивных восходящих и нисходящих потоков, закручиваемых силами Кориолиса. Смерч по мнению этих наблюдателей это гигантская гравитационно-тепловая термодинамическая машина [2].

Существует гипотеза образования смерчей, предложенная Вегенером [3]. Согласно ей источниками смерчей являются горизонтальные

цилиндрические вихри, образующиеся в атмосфере на границе горизонтальных ветровых потоков противоположных направлений. Эти вихри под действием восходящих потоков воздуха изгибаются, превращаясь в вертикальные вихри (мезоциклоны), а затем каким-то образом – в смерчи.

Замеченные исследователями наличие электрических явлений, сопровождающих торнадо, позволило этим исследователям предложить модель плазменной природы смерча и трактовки его как газового разряда в атмосфере [4].

Существует и множество других теорий, берущих за основу какой-либо из заметных факторов, сопровождающих вихрь.

Однако, кроме качественных и оценочных соображений, в конечном итоге так и не предложено до нашего времени каких-либо конкретных механизмов образования и эволюции вихрей. Ведь под вихрем следует понимать весьма широкий спектр природных и физических явлений. Это не только торнадо, но и кратковременный летний пылевой вихрь, или снежный вихрь, водоворот на реке, огненный смерч, аэродинамический вихрь и т. д.

В статье предпринята попытка с единой позиции раскрыть общую природу вихрей.

**Постановка задачи.** Для понимания проблемы вихрей отметим обязательное условие для их возникновения. Необходимым условием появления любого вихря является наличие перемещающейся среды. Только в движущемся потоке возможно появления вихрей. Отсутствие движущейся среды исключает такую возможность.

Представим вихрь (рис. 1) в виде сплошного цилиндра диаметром  $d$  в потоке, скорость которого равна  $v$ .

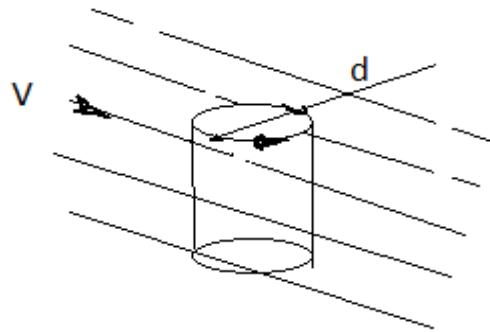


Рис. 1. Вихрь в потоке

Вихрь и набегающий на него поток суть одной и той же среды, состоящей из идентичных частиц материи. Поэтому неизбежно взаимодействие этих частиц между собой. Частицы в своем движении постоянно хаотически сталкиваются. Каждая из  $i$ -той частиц обладает импульсом (количеством движения). Значение импульса  $\vec{p}_i$  определяется как векторная величина, направление которой совпадает с направление вектора скорости.

$$\vec{p}_i = m \vec{V}_i \quad (1)$$

где  $m$  – масса частицы;  $V$  – скорость частицы.

При столкновении частиц происходит изменения импульса каждой из них.

Другой важной характеристикой частиц является их энергия. Имея определенную скорость, частицы обладает соответствующей кинетической энергией. Столкнувшись и обмениваясь импульсами, частицы обмениваются между собой энергиями.

Столкновение частиц имеет ярко выраженный случайный характер, поэтому возникает естественный вопрос, каким образом из хаотического движения частиц возникает устойчивая и упорядоченная структура в виде вихря. Природа показывает, что вихри не только возможны, но они также способны продолжительно и устойчиво существовать. Феномен вихрей

свидетельствует о существовании неких природных закономерностей, раскрытие которых предпринято в настоящей статье.

**Решение задачи.** Используем основополагающие природные законы сохранения: закон сохранения энергии и закон сохранения импульса.

Закон сохранения энергии гласит, что в замкнутой физической системе энергия, как некоторая численная величина, не меняется ни при каких превращениях, происходящих в природе [6, с. 25]. Полная механическая энергия частиц системы остается постоянной.

Закон сохранения импульса, утверждает, что в замкнутой физической системе векторная сумма импульсов всех частиц остается неизменной при любых взаимодействиях и любых движениях частиц этой системы [6, с. 26-27].

Эти законы сохранения имеют общеприродный характер и применимы также в микромире с исчезающими малыми, как в нашем случае, размерами частиц.

Законы сохранения справедливы не только для замкнутых систем, но и для систем, находящихся в постоянном внешнем поле [6, с. 25]. В нашем случае под внешним полем подразумеваем поток, в котором образовался вихрь. Вихрь является порождением потока и его нельзя рассматривать вне зависимости от этого потока. Физическая система включает два взаимодействующих объекта: вихрь и формирующий его поток.

Из закона сохранения энергии следует, что энергия вихря не может превысить энергию потока, его образовавшего. Полная механическая энергия частиц системы остается постоянной.

Проверку сохранения энергии выполним расчетным путем.  
Кинетическая энергия вращательного движения [5]

$$E_{\text{вр}} = \frac{1}{2} J w^2, \quad (2)$$

где  $J$  – момент инерции;  $w$  – угловая скорость.

Момент инерции тел в форме сплошного цилиндра

$$J = \frac{1}{2}mr^2 = \frac{md^2}{8}, \quad (3)$$

где -  $r$ ,  $d$  – радиус и диаметр цилиндра соответственно;  $m$  – масса цилиндра, равная

$$m = \rho\pi r^2 h = \frac{\rho\pi h d^2}{4}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность материала цилиндра. Единица измерения плотности –  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

С учетом (4) момент инерции цилиндра равен

$$J = \frac{\rho\pi h d^4}{32}. \quad (5)$$

Кинетическая энергия вращательного движения после подстановки (5)

$$E_{\text{вр}} = \frac{\rho\pi h d^4}{64} w^2. \quad (6)$$

Угловая скорость  $w$  определяется отношением

$$W = \frac{v}{r} = \frac{2v}{d},$$

где  $v$  – линейная окружная скорость цилиндра  $\left(\frac{\text{м}}{\text{сек}}\right)$ .

Кинетическая энергия вихря, выраженная через линейную скорость

$$E_{\text{вихр.}} = \frac{\rho\pi h d^2 v^2}{16}, \quad (7)$$

где  $v$  – линейная окружная скорость вихря (м/сек).

Проведем расчет для конкретного примера. Пусть дано:

$\rho = 1,25 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  – плотность в воздухе;

$h = 1\text{м}$  – высота цилиндра;

$d = 1\text{м}$  – диаметр цилиндра;

$v = 1\left(\frac{\text{м}}{\text{сек}}\right)$  – линейная окружная скорость цилиндра.

$$E_{\text{вихр.}} = \frac{1,25 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \times 3,14 \times 1\text{м} \times 1\text{м}^2 \times 1\left(\frac{\text{м}}{\text{сек}}\right)^2}{16} = 0,245 \text{кгм}^2/\text{сек}^2 = 0,245 \text{дюйль.}$$

Для сравнения, при тех же исходных данных, рассчитаем кинетическую энергию потока, пересекающего площадь поперечного сечения вихря. Кинетическая энергия поступательного движения [5] потока

$$E_{\text{поток}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{\rho dhvtv^2}{2} = \frac{\rho dhvtv^3}{2}, \quad (8)$$

где  $m$ (ежесекундный массовый расход) =  $\rho dhvt$ ;  $t$ -время = 1сек.

$$E_{\text{поток}} = \frac{1,25 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \times 1\text{м} \times 1\text{м} \times 1\text{сек} \times 1 \left( \frac{\text{м}}{\text{сек}} \right)^3}{2} = 0,625 \text{кгм}^2/\text{сек}^2 = 0,625 \text{джоуль}.$$

В расчетах мы умышленно приравняли окружную скорость вихря со скоростью набегающего потока  $v = 1 \left( \frac{\text{м}}{\text{сек}} \right)$ . Из опыта мы знаем, что линейная скорость вихря всегда выше скорости набегающего потока, однако нас интересовал самый начальный момент зарождения вихря, когда скорость потока и вихря существенно не отличаются. Причиной тому естественная неразрывность и вязкости среды. Те частицы, которые мгновением ранее были частью потока, с той же скоростью продолжат движение в теле вихря в самый первый момент его зарождения.

Расчеты выявили, что энергия зарождающегося вихря (0.245джоуль) значительно ниже энергии, породившего его потока (0,625джоуль). Если предположить, что упрощенная геометрия вихря на рис. 1 не отражает реальность, а ближе по форме, например, к полой трубе, то отмеченная разница будет еще более значимой, поскольку масса и момент инерции трубы меньше чем сплошного цилиндра того же наружного диаметра.

Возникающий энергетический "провал" объясняется уменьшением скорости и соответственно энергии частиц, оказавшихся в менее подвижной центральной области вихря. В соответствии с законом сохранения системы незамедлительно начнет сближать энергию вихря с энергией потока. Процесс произойдет настолько быстро, насколько это позволяют инерционные и вязкостные свойства среды.

Начальный дефицит энергии зарождающегося вихря является основной причиной развития вихреобразования. Если в потоке выделилась

некая группа частиц с начальным общим вращением, то это вращение уже не останавливается, а продолжает развиваться с вовлечением все новых частиц среды. Начальный толчок к вращению возникает либо в результате воздействия внешних факторов, либо случайно из-за хаотических столкновений частиц между собой.

Механизм передачи энергии от потока к вихрю обусловлен законом сохранения импульса. Выше отмечено, что уменьшение импульса одних частиц системы всегда приводит к соответствующему увеличению импульса других частиц системы. Векторная сумма импульсов частиц остается неизменной. Снижение импульса частиц центральной области вихря будет компенсировано ускорением частиц стенки вихря. Стенка вихря будет разгоняться до тех пор, пока кинетическая энергия вихря не сравняется с кинетической энергией потока. В итоге линейная скорость вихря превысит скорость потока, в котором он образовался.

В классическом определении [6, с. 24] энергия является мерой всевозможных форм движения материи. В нашем случае поступательная форма движения потока преобразуется во вращательную форму движения вихря. В реальных условиях такой переход всегда сопровождается безвозвратной потерей какой-то части энергии. Поэтому фактически энергия вихря не достигает уровня энергии потока. Между вихрем и потоком образуется энергобарьер, который обеспечивает устойчивость вихря. В стационарном потоке, зародившийся вихрь существует неограниченное время. Вихревое образование в экваториальной области планеты Юпитер человечество наблюдает уже столетиями.

Процесс вихреобразования демонстрирует природный эволюционный процесс самоорганизации закрытой физической системы за счет потери некоторой части энергии.

В земных условиях параметры потока непостоянны, поэтому возможна ситуация, при которой инерционность вихря не успевает за изменениями потока.

Энергия вихря может превысить энергию потока, что нарушит устойчивость и приведет к разрушению вихря.

Понимание природы вихрей служит основой борьбы с разрушительными торнадо. Чтобы разрушить торнадо достаточно повысить его энергию над уровнем окружающего потока. Этого можно достичь с использованием, например, объемного взрыва. Мощность взрыва относительно небольшая, поскольку требуется преодолеть лишь небольшой энергетический “зазор” между вихрем и потоком.

**Энергия торнадо.** Мы выяснили, что энергия вихря не больше, а на самом деле даже несколько меньше энергии окружающего потока. Такое утверждение требует дополнительных разъяснений, поскольку общезвестно, что наибольшие разрушения вызывает именно торнадо, а не окружающая его среда.

Необходимо сразу отсечь, достаточно часто культивируемое, ошибочное мнение, что торнадо каким-то образом концентрирует сверхэнергию из окружающего пространства. Закон сохранения незыблем – энергия никогда не передается от менее энергоемкому источнику.

Разрушения от торнадо это фактически выполненный объем механической работы. В механике работа рассчитывается произведением модуля силы на модуль перемещения. Чем больше приложенная сила, тем больший объем работы она может выполнить за единицу времени. Появление силы в торнадо обусловлено динамическим воздействием потока на препятствие, преграждающее ему движение.

В аэrodинамике эту силу называют силой аэродинамического сопротивления [7], которую рассчитывают по известной формуле

$$F = c_x \frac{\rho s}{2} v^2 , \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность среды;  $s$  – площадь поверхности, на которую действует поток;  $v$  – скорость потока;  $c_x$  – безразмерный коэффициент сопротивления, который для случая плоской пластины, установленной перпендикулярно к потоку, примерно равен единице.

Скорость стенки торнадо по оценкам исследователей может достигать весьма больших величин. Нередко 100 и более метров в секунду. При такой скорости на каждый квадратный метр строения будет действовать сила

$$F = c_x \frac{\rho s}{2} v^2, = 1 \times \frac{1,25 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \times 1 \text{м}^2}{2} \times \left(100 \frac{\text{м}}{\text{сек}}\right)^2 = 6250 \frac{\text{кгм}}{\text{сек}} = 6,25 \text{ тонн}$$

Горизонтальная скорость среды редко превышает 20 м\сек., развивая силу

$$F = c_x \frac{\rho s}{2} v^2, = 1 \times \frac{1,25 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \times 1 \text{м}^2}{2} \times \left(20 \frac{\text{м}}{\text{сек}}\right)^2 = 250 \frac{\text{кгм}}{\text{сек}} = 0,25 \text{ тонн}$$

Сила торнадо, в нашем примере, в 25 раз превышает силу среды.

В окружающей вихрь среде плотность энергоносителей рассеяна, а в теле вихря упорядочена. Плотность энергоносителей в теле вихря возрастает от центра к стенке. В силу закона сохранения энергии вихрь не может аккумулировать в себе энергию, превышающую энергию окружающего потока, но за счет перераспределения плотности энергоносителей по объему, является своеобразным концентратором силы. Поэтому правильно считать вихрь концентратором силы, а не концентратором энергии.

**Аналитическое решение задачи.** Будем считать потерю энергии от смены формы движения относительно небольшой. Тогда энергию потока можно приравнять к энергии вихря

$$E_{\text{поток}} = E_{\text{вихр.}} . \quad (10)$$

В развернутом виде, используя (7) и (8)

$$\frac{\rho dt v_{\text{потока}}^3}{2} = \frac{\rho \pi d^2 v_{\text{вихря}}^2}{16} \quad (11)$$

После сокращений и несложных преобразований получим

$$v_{\text{вихря}} = \sqrt{\frac{8 t v_{\text{потока}}^3}{\pi d}} . \quad (12)$$

Универсальная формула (12) описывает существование вихря в потоке. Формула отличается неоднозначностью. Скорость вихря зависит не только от скорости набегающего потока, но и от диаметра сформировавшегося вихря. В одинаковых исходных условиях могут существовать вихри разных диаметров. Причем вихри меньшего диаметра имеют выше скорость, чем вихри большего диаметра. Однако, если вихрь сформировался и известен его диаметр, то по формуле (12) можно рассчитать его скорость.

**Расчетные примеры.** Начнем с речного водоворота. Пусть скорость течения реки равна 1 м. в сек. или 3,6 км в час. Рассматривая образовавшийся на реке водоворот, оценим его окружную скорость на расстоянии 0,5 м. от центра вращения, то есть мысленно ограничим диаметр водоворота одним метром. Согласно формуле (12) эта скорость составит

$$v_{\text{вихря}} = \sqrt{\frac{8tv_{\text{потока}}^3}{\pi d}} = \sqrt{\frac{8 \times 1 \text{ сек} \times \left(\frac{1 \text{ м}}{\text{сек}}\right)^3}{3.14 \times 1 \text{ м}}} = 1,6 \frac{\text{м}}{\text{сек}} = 5,76 \text{ км в час}$$

Понятно, что в приведенном примере не ставился строгий научный эксперимент. Однако полученное расчетное значение примерно соответствует тому, что мы наблюдаем на реках с небыстрым течением.

Разберем снежный вихрь. Сразу отметим, что из-за низкой температуры, влияние термопотоков в данном случае незначительно и образование снежных вихрей всецело зависит от скоростного ветрового потока. Снежные вихри возможны уже при скоростях ветра начиная с 5 м. в сек. При таком ветре и диаметре вихря в 2 м наблюдаемая скорость периферии вихря будет

$$v_{\text{вихря}} = \sqrt{\frac{8 \times 1 \text{ сек} \times \left(\frac{5 \text{ м}}{\text{сек}}\right)^3}{3.14 \times 2 \text{ м}}} = 12,65 \text{ м. в сек.}$$

При более высоких значениях ветра скорость снежного вихря увеличивается.

Пылевой вихрь в отличие от снежного может возникнуть в относительно спокойной атмосфере. Это свидетельствует о том, что

основной движущей силой пылевых вихрей служит не горизонтальный ветровой поток, а термопотоки, поднимающиеся вертикально вверх от нагретой поверхности. Но термопотоки также имеют свою скорость, в данном случае вертикальную, и соответственно кинетическую энергию. Энергия скалярная величина, косвенно зависящая от величины модуля импульса частиц, но не зависящая от направления вектора скорости этих частиц. Подпитка вихря вертикальной составляющей потока происходит точно так же, как и горизонтальной составляющей.

Допустим мы наблюдаем вертикальную скорость подъема пылевых частиц 3 м/сек., тогда окружная скорость пылевого вихря при диаметре 1 м. составит.

$$v_{\text{вихря}} = \sqrt{\frac{8 \times 1 \text{ сек} \times \left(\frac{3 \text{ м}}{\text{сек}}\right)^3}{3.14 \times 1 \text{ м}}} = 8,31 \text{ м. в сек.}$$

Со стороны внешнего наблюдателя вертикальный подъем пылевых частиц происходит по винтовой линии.

Аналогичный механизм огненного смерча.



**Рис. 2. Огненный смерч**

Наконец, переходим к проблеме торнадо. Исследователи отмечают типичную скорость перемещения торнадо над поверхностью земли в пределах 40 – 60 км. в час. или 11 - 17 м. в сек. Ветровой поток такой интенсивности составляет только часть энергии, получаемой торнадо. Торнадо интенсивно использует энергию вертикальных потоков.

По мнению исследователей и потому какие предметы торнадо в состоянии приподнять над Землей, скорость вертикальных потоков вполне может достигать 50 м. в сек. При такой скорости, и даже без учета горизонтальной составляющей ветра, скорость вращения торнадо при диаметре 30 м. составит

$$v_{\text{вихря}} = \sqrt{\frac{8 \times 1 \text{сек} \times \left(\frac{50 \text{м}}{\text{сек}}\right)^3}{3.14 \times 30 \text{м}}} = 103,3 \text{ м. в сек. или } 370.9 \text{ км. в час.}$$

при диаметре 300 м.,

$$v_{\text{вихря}} = \sqrt{\frac{8 \times 1 \text{сек} \times \left(\frac{50 \text{м}}{\text{сек}}\right)^3}{3.14 \times 300 \text{м}}} = 32,6 \text{ м. в сек. или } 117.3 \text{ км. в час.}$$



**Рис. 3. Смерч приподнимает предметы над Землей**

Летающие предметы на некотором удалении от тела смерча (рис. 3) подтверждают неразрывность существования вихря и потока. Смерч подпитывается энергиями как вертикальных так и горизонтальных составляющих ветра.

Скорость вихря зависит от суммы скоростей формирующих его потоков, т. е. в конечном итоге от величины суммарного импульса системы. Каким образом увеличивается импульс не имеет значение. Наблюдаемые факторы, сопровождающие вихрь, должны рассматриваться с позиций насколько они способны повысить суммарный импульс системы.

Интенсивное испарение и конденсация паровоздушных масс над нагретой поверхностью океана вносят ощутимый вклад в развитие торнадо. Очевидный прирост импульса за счет теплового движения частиц приводит к увеличению энергии системы. Сложность состоит в том, что импульс векторная величина, а энергия - скалярная. Перенос импульса в энергию описывается не вполне подобными уравнениями и не поддается прямому пересчету.

Автор благодарен д. т. н. Гаеву Е. А. за конструктивные и полезные замечания в процессе написания статьи, а также Мальчевской О.О. за помощь в оформлении статьи.

**Выводы.** Вихрь и породивший его поток – два тесно взаимодействующие объекта одной и той же физической системы.

Зарождение, развитие и разрушение вихря - это естественный природный эволюционный процесс, движущей силой которого служит затраченная энергия (в рамках законов сохранения), направленная на смену поступательной формы движения материальных частиц на вращательную.

Вихрь в силу закона сохранения не может аккумулировать энергию, превышающую уровень энергии окружающего потока, но за счет перераспределения плотности энергии по объему является своеобразным концентратором силы.

Торнадо можно разрушить, нарушив его энергообмен с окружающим потоком.

## **Литература**

1. Хайн А.П. Математическое моделирование тропических циклонов. Л.: «Гидрометеоиздат», 1984.
2. Налівкін Д.В. Смерчі. М.: Наука, 1984.
3. Колобков Н.В. Грозы и шквалы. М. Л.: ГИТТЛ, 1951.
4. Боев А.Г. Плазменная теория смерча. Вопросы атомной науки и техники. 2008. № 4.

5. Элементарный учебник физики. Под ред. Г. С. Ландсберга. М. Наука, 1985. 608 с.
6. Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М. Теоретическая физика. 5-е изд. М.: Физматлит, 2004. Т. I. Механика. 224 с.
7. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: ГИТЛ, 1957.